

都市の大気境界層に関する一次元数値シュミレーション

大黒, 雅之
九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻 : 大成建設

片山, 忠久
九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

林, 徹夫
九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

堤, 純一郎
日本学術振興会 : 東和大学

<https://doi.org/10.15017/17143>

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 11 (1), pp.67-75, 1989-06-01. 九州大学大学院総合理工学研究科
バージョン :
権利関係 :

都市の大気境界層に関する一次元数値シミュレーション

大黒 雅之**・片山 忠久*
林 徹夫*・堤 純一郎***
(平成元年2月28日 受理)

One-dimensional Numerical Simulation of Urban Atmospheric Boundary Layer

Masayuki OGURO, Tadahisa KATAYAMA,
Tetsuo HAYASHI and Jun-ichiro TSUTSUMI

It is necessary to simulate the air temperature in urban boundary layers under various conditions for improvement of the urban thermal environment. One-dimensional numerical model for the atmospheric boundary layer is applied to the urban area in this paper. The atmospheric boundary layer is regarded to be composed of three layers, the canopy layer, the surface layer and the Ekman layer. In the Ekman layer, potential temperature and specific humidity are calculated. In the surface layer, the vertical distributions of wind speed, potential temperature and specific humidity are solved from the universal function, a function of the stability of the atmosphere. The canopy layer means under the average height of buildings. Wind speed, air temperature and specific humidity are regarded as uniform here. Heat balance is solved on the ground and buildings surface. Several parameters are set in this model. This simulation model is applied to the urban area where the field observation was carried out to examine the accuracy of this model. If several parameters are adjusted for the field observation condition, the results of the numerical simulation are corresponding to the field data. Moreover, the sensibility of these parameters on the urban atmospheric boundary layer are examined.

1. はじめに

都市の熱環境を改善し、より快適な居住空間を作り出すことは、都市計画上の重要な指針となるべきものである。そのためには、まず種々の状況における都市熱環境を予測することが必要である。現実の場で実験することが事実上不可能であることから、数値シミュレーションはそのための有効な手段である。本報はこのような数値シミュレーションのひとつとして、都市上空の大気境界層と都市キャノピー内の物体表面における熱収支を結び付けた一次元数値モデルにより、都市熱環境の予測を行うものである。一次元モデルとは鉛直方向の風速、温度および湿度の分布を対象とする

もので、水平方向の移流を考慮しないことから、一般的な都市の状態が無限に続くものと仮定したものである。これは現実の複雑な都市の構成を厳密に表現できるものではないが、風上方向のある程度の範囲の地表面の状態がほぼ一様であると見なすことができる場合には、近似的にこのようなモデルにより都市熱環境を予測できるものとする。また、一次元ではあるが、計算モデル内に都市熱環境の形成に関わるいくつかのパラメータを設定し、種々の条件における都市熱環境を予測する、あるいはそれらのパラメータが都市熱環境に与える影響について考察することも可能である。

都市大気的一次元モデルは Myrup¹⁾ に始まり、主に気象学分野で発達してきた。しかし、従来のモデルでは地表面における建物等の凹凸が大気境界層の粗度として考慮されるだけであったので、壁面等建物表面における熱収支を具体的にモデル化することはできなかった。都市計画的な観点からすれば、建物や道路

*熱エネルギーシステム工学専攻

**熱エネルギーシステム工学専攻修士課程(現在 大成建設勤務)

***日本学術振興会特別研究員(現在 東和大学講師)

の表面における熱収支が都市の気温や風速に与える影響について明らかにすることが重要であり、建物の表面を考慮して熱収支を解くべきである。それにより、建物の形状や密度と都市熱環境との関係など、より具体的な考察が可能となる。

本報では建物形状やその配置を考慮するためのひとつの試みとして、熱収支に関して建物の表面積を地表面の面積の増大と考へて、都市キャノピーをモデル化する。これと大気境界層モデルを結び付けて一次元モデルを作成する。このモデルを福岡市内における実測地点²⁾に適用してその精度の検証を行い、さらに都市の熱環境形成に関わるいくつかの要素について、パラメータ解析を行っている。

2. 一次元計算モデル

本報で数値計算に用いる一次元モデルの概念図を Fig. 1 に示す。大気境界層を高さ 100m までの接地層とそれから高さ 2000m までのエクマン層とに分けて考へる。また、地表面から平均建物高さまでをキャノピー層として、内部の風速や気温の分布を考へず平均的な取り扱ひをする。さらに、建物表面あるいは地表面から垂直方向に 50cm の深さまでを伝導層とする。以下に各層の基礎式について述べる。

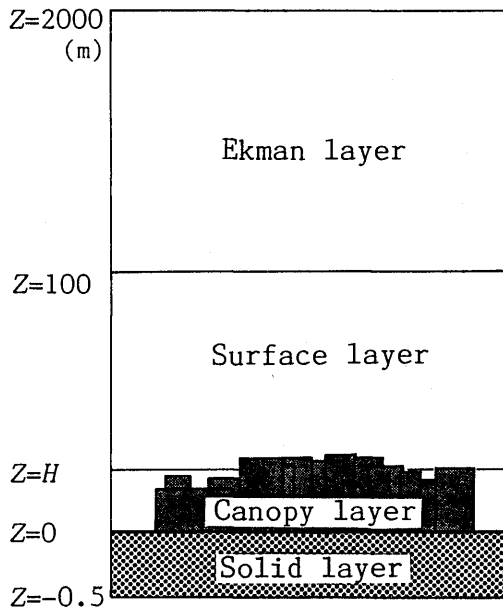


Fig. 1 Outline of 1-dimensional model.

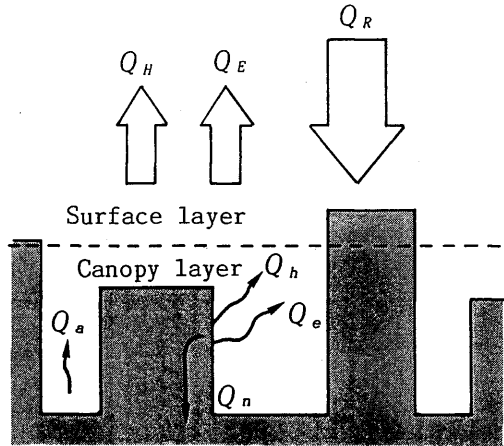


Fig. 2 Heat transfer in canopy layer.

2.1 エクマン層

エクマン層を支配する方程式は、水平方向の移流を無視すれば熱量と水蒸気の拡散に関してそれぞれ (1)、(2) 式で表せる³⁾。渦拡散係数は O'Brien の式⁴⁾で与え、 $K_e = K_h$ とする。但し、運動量に関しては接地層上端で風速を与えるものとし、エクマン層内の風速変化は考へない。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} (K_h \frac{\partial T}{\partial Z}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} (K_e \frac{\partial q}{\partial Z}) \quad (2)$$

2.2 接 地 層

接地層では運動量や熱のフラックスが一定で、Monin-Obukhov の相似則⁵⁾が成り立つものとする。これは次元解析より、(3)、(4)、(5) 式を満たす普遍関数 ϕ が存在し、無次元高さ ξ が各物理量の勾配を決定するものである。

$$\frac{\partial U}{\partial Z} = \frac{U_*}{\kappa Z} \phi_m(\xi) \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial Z} = \frac{T_*}{\kappa Z} \phi_h(\xi) \quad (4)$$

$$\frac{\partial q}{\partial Z} = \frac{q_*}{\kappa Z} \phi_e(\xi) \quad (5)$$

$$T_* = Q_H / \rho C_p U_* \quad (6)$$

$$q_* = Q_E / C_p U_* \quad (7)$$

$$\xi = Z/L \quad (8)$$

$$L = -U_*^2 T_0 / \kappa g T_* \quad (9)$$

ξ と安定度長さ L は (8), (9) 式で定義され, $\xi = 0$ のとき大気は中立となり, $\xi < 0$ のとき不安定, $\xi > 0$ のとき安定となる. 普遍関数は実測により決定されるが, ここでは Kondo らによる次式³⁾を使用する.

$-2 \leq \xi \leq 0$ のとき

$$\phi_m = 0.98(1 - 16.4\xi)^{-1/4}$$

$$\phi_h = 0.98(1 - 16.4\xi)^{-1/2}$$

$0 \leq \xi \leq 0.3$ のとき

$$\phi_m = \phi_h = 1 + 6\xi \quad (10)$$

$0.3 \leq \xi$ のとき

$$\phi_m = \phi_h = (1 + 22.8\xi)^{1/2}$$

但し, 水蒸気に関しては $\phi_e = \phi_h$ とする.

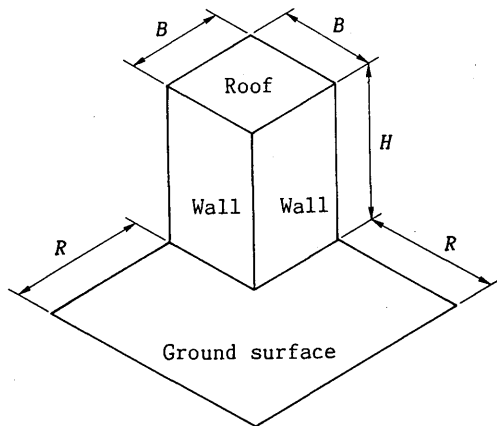


Fig. 3 Building layout.

2.3 都市キャノピー層のモデリング

キャノピー内はすべて平均的に取り扱い中の分布は考えていない. 建物による地表面の増大を考慮して熱収支を解き, これを建物表面と地表面の平均的なものとする. キャノピー層における熱収支の概念を Fig. 2 に示す. 単位水平面積当りの建物表面を含む実際の表面積を都市の表面積増加率 A とすると, 建物や地表面における平均的な熱収支は次式で表せる.

$$Q_R/A = Q_h + Q_n + Q_e \quad (11)$$

$$Q_R = aS_R + \varepsilon (L_R - \sigma T_s^4) \quad (12)$$

キャノピー層内の平均的な建物と街路の配列を Fig. 3 のように考え, A を次式で与える.

$$A = \{(B+R)^2 + 4HB\} / (B+R)^2 \quad (13)$$

以下に (11) 式中の各熱流成分の計算及びそのためのモデル化について述べる.

2.3.1 日射吸収率と長波長放射率

都市キャノピー層の見かけの日射吸収率及び長波長放射率は, 日影や相互放射によって原材料の日射吸収率や長波長放射率とは異なってくる⁶⁾ので, 都市の吸収する日射量や大気放射量は, 建物高さや配列により複雑に変化する. 日射吸収率や長波長放射率は都市の受け取る熱量を決定するため, その影響は大きい, ここでは, 簡単のため日射吸収率, 長波長放射率を建物の形状や配列と独立したパラメータとして扱い, 時間変化も考えない.

2.3.2 伝導熱量

壁面も地表面も伝導層内は同一材料とし, 深さ 50cm のところで温度境界条件を与える.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{C_s} \frac{\partial^2 \theta}{\partial n^2} \quad (14)$$

$$Q_n = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} \quad (15)$$

2.3.3 粗度

接地層の風速プロファイルを決定するパラメータとして地表面の粗度を用いることが多いが, ここでは, これを次式⁷⁾により建物配列から求める.

$$Z_0 = 0.5 \frac{Hs}{S} \quad (16)$$

Z_0 は粗度, H は粗度物体となる建物の平均高さ, s は建物 1 個の風向に対する見付け面積, S は建物 1 個当りの地表面積である. ここでは, 建物配列を Fig. 3 のように仮定し, 風向は壁面に垂直であると考える.

$$s = HB \quad (17)$$

$$S = (B+R)^2 \quad (18)$$

2.3.4 キャノピー層内の平均風速

壁面や地表面からの対流熱伝達量や蒸発量の計算に

はキャノピー層内の平均的な風速を用いる。ここでは、植物キャノピー内の風速分布に用いられている次のような半経験式⁹⁾を応用してキャノピー内の平均風速を求める。

$$U = U_H \exp [\gamma (Z-H)] \quad (19)$$

定数 γ は中立時の高さ H における風速分布の連続を仮定して次のように与える⁹⁾。

$$\frac{1}{\gamma} = H \ln \left(\frac{H}{Z_0} \right) \quad (20)$$

(19) 式よりキャノピー内の平均風速は次式となる。

$$U_c = \frac{U_H}{\gamma H} [1 - \exp(-\gamma H)] \quad (21)$$

2.3.5 対流熱伝達と蒸発

壁面及び地表面を流体力学的に粗な面と考え、粗面に対する対流熱伝達として、Yaglom-Kadar の式¹⁰⁾を用いる。

$$C_h = U_* (2.12 \ln y_+ + \beta) / U_c \quad (22)$$

$$\beta = 0.55 h_+^{1/2} (Pr^{2/3} - 0.22) - 2.12 \ln h_+ + 9.5 \quad (23)$$

$$y_+ = y u_* / \nu \quad (24)$$

$$h_+ = h u_* / \nu \quad (25)$$

U_* は平均風速 U_c を表面の近傍風速と考え、表面近傍に対数法則を仮定して次式より求める。

$$U_* = \kappa U_c / \ln(y/y_0) \quad (26)$$

ここでは、 $h=1\text{cm}$, $y_0=h/10$, $y=0.1\text{m}$ と仮定している。これにより対流熱伝達量は次のようになる。

$$Q_h = \rho C_p U_c C_h (T_s - T_c) \quad (27)$$

潜熱に対しては、表面の不飽和の程度を表すパラメータとして蒸発比 f を使用すれば、次のように表せる。

$$Q_e = l \rho U_c C_f (q_s - q_c) \quad (28)$$

但し、 $C_e = C_h$ と仮定する。

2.3.6 接地層における熱フラックス

接地層の熱フラックスは次式で与える。

$$Q_H = A Q_h + Q_e \quad (29)$$

$$Q_E = A Q_e \quad (30)$$

従来の都市大気モデルでは、人工熱は近似的な取り扱いをすることが多く、放射のように地表面温度を直接上昇させるものであったが、実際には空調による廃熱、自動車の廃熱などほとんどの人工熱は空気に直接廃棄されるものである。従ってここでは、キャノピー内の空気層における発熱として人工廃熱を考えている。

3. モデルの検証

前述の計算モデルの現実性を検討するため、市街地における実測結果との比較を試みる。筆者らは、福岡市内の市街地において、係留気球を用いて風と気温の垂直分布の一昼夜観測を行っている²⁾。ここではその観測結果の一部を利用する。観測日の日中には海からの風が卓越しており、比較の対象とするデータの観測地点は、風上側に1.2km程度程度の市街地を控えている。海からの距離が短く境界層は十分に発達しないが、地表付近は既に市街地に馴染んでいると考えられることから、高さ80mにおける実測値を境界条件として与え、接地層のみの計算によって地表面の気温変化をある程度再現することは可能と考えられる。観測結果によれば、風速分布に対する粗度は0.2m程度であり、(16), (17), (18) 式より $R=B=10\text{m}$, $H=5\text{m}$ とする。伝導層はコンクリートを仮定して $\lambda=1.5\text{W/mK}$, $C_s=2.0\text{MJ/m}^3\text{K}$ とし¹¹⁾、その他のパラメータを適宜変化させて気温変化を実測と一致させることを試みた。

Fig. 4 に高さ5mにおける気温変化の比較を示す。実

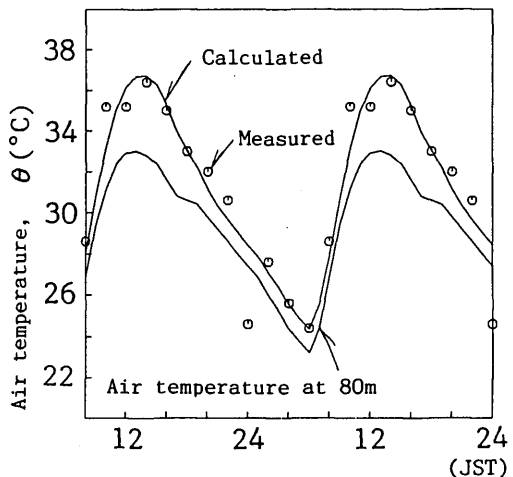


Fig. 4 Comparison of calculated air temperature at $Z=5\text{m}$ with measured one.

測値のばらつきは大きい、全体的な日変化はほぼ対応している。このとき与えたパラメータは以下のとおりである。

$$Q_a = 20\text{W/m}^2, f = 0.05$$

$$a = 0.75, \epsilon = 1.0$$

気温の鉛直プロフィールの比較を Fig. 5 に示す。鉛直プロフィールもほぼ一致している。24時の気温の極端な不一致は下層に冷気の移流があったためと考えられる。不確定パラメータが多く十分な検証とはならないが、与えたパラメータが常識的な値であることから、本モデルはある程度実際の現象を再現できるものと考えられる。

4. 熱環境形成に関わるパラメータ解析

4.1 都市モデルと田園モデル

ヒートアイランドの研究にみられるように都市の熱環境は郊外や田園地域との比較によって、その特徴が明確になる。ここでは、都市と田園の熱環境の違いをシミュレーションにより比較する。都市のパラメータとして以下の値を与える。

$$a = 0.75, \epsilon = 1.0, \lambda = 1.5\text{W/mK}$$

$$C_i = 2.0\text{MJ/m}^3\text{K}, Q_a = 0\text{W/m}^2$$

$$f = 0, H = B = R = 10\text{m}$$

すなわち、都市を構成する材料はコンクリート、表面

は完全に乾燥しており、人工廃熱はないと仮定する。

田園については、建物はなく、粗度は $Z_0 = 0.05\text{m}$ とする。表面は湿った土とし、 $\lambda = 0.5\text{W/m}^2$, $C_i = 1.5\text{MJ/m}^3\text{K}$, $f = 0.5$ を仮定し、その他は都市と同じ値を与えている。日射量は福岡における夏季の快晴日を想定し、日赤緯を20度、大気透過率を0.65として Bouguer と Berlage の式より求める¹³⁾。大気放射量は 390W/m^2 の一定値とする。境界条件は上空2000mで $\theta = 28^\circ\text{C}$, $q = 0.015\text{kg/kg}$, 上空100mで $U = 6\text{m/s}$, 伝導層内50cmで $\theta = 28^\circ\text{C}$ とする。エクマン層の初期条件は $\theta = 28^\circ\text{C}$, $q = 0.015\text{kg/kg}$, 伝導層の初期条件は $\theta = 28^\circ\text{C}$ であり、朝8時から次の日の24時まで計算する。都市及び田園の気温、表面温度、及び深さ25cmの伝導層内温度の計算結果を比較して Fig. 6 に示す。都市気候に関する研究により明らかにされた都市の気温変化の最大の特徴は、田園や郊外と比較して日較差が小さく夜間の気温が高いことであり、計算結果はこの特徴をよく再現している。また、1日目の最高気温がほとんど変わらないのに対して2日目には都市の方が2℃高くなっており、都市の気温は日を追って高くなる傾向がある。Fig. 7 に熱収支の計算結果を示す。但し、各フラックスは水平面に対するものであり、吸収日射と伝導のフラックスは下向きを正とし、その他の成分は上向きを正としている。田園では、吸収された日射量の約半分が潜熱として費やされるのに対し都市では伝導と対流が大きい。日中、伝導層に蓄えられた伝導熱は夜間に長波長放射として放出されるために、都市の夜間の表面温度が高くなっていると考えら

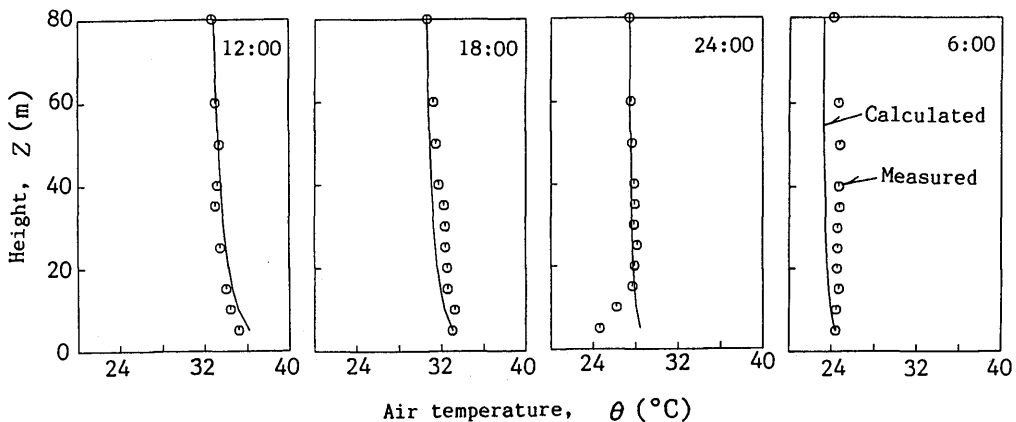


Fig. 5 Comparison of calculated air temperature profiles with measured ones.

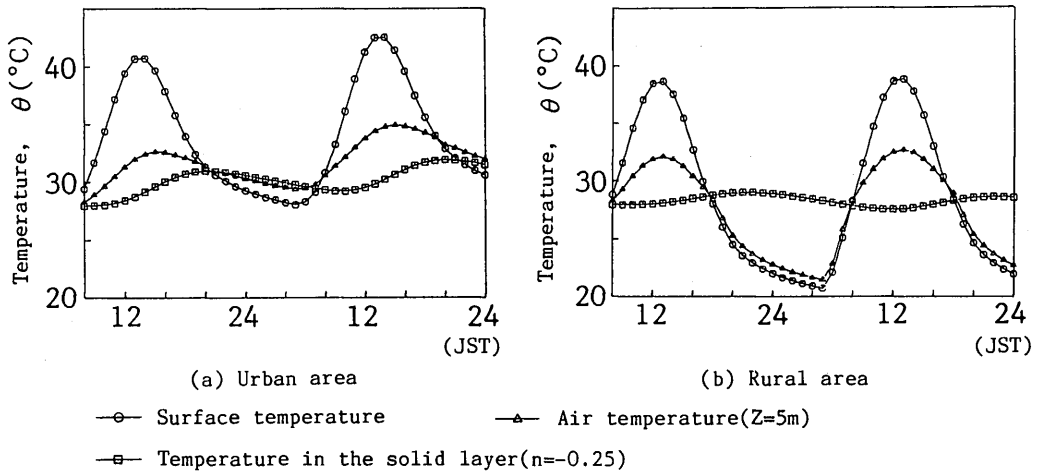


Fig. 6 Fluctuations of calculated temperatures in typical urban and rural areas.

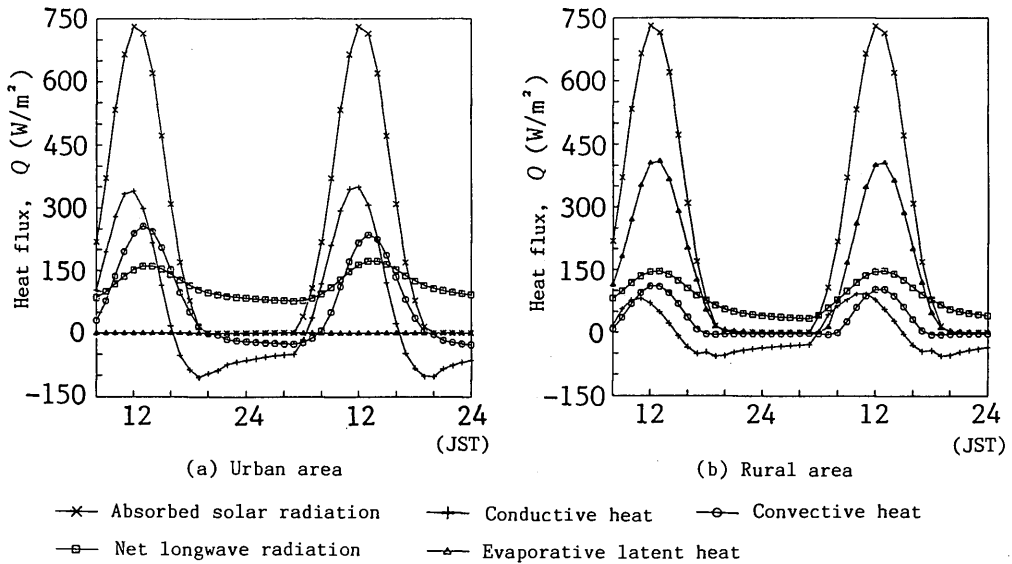


Fig. 7 Fluctuations of heat fluxes in typical urban and rural areas.

れる。また、日中の大きな対流熱が2日目の気温上昇を引き起こす原因と考えられる。

4.2 都市モデルに関するパラメータ解析

本節では都市の熱環境に関するパラメータを変化させて、それらの熱環境への影響について考察する。ここで取り上げるパラメータは建物の高さ、人工発熱、

蒸発比、日射吸収率、熱伝導率および容積比熱の6種類である。これらの各パラメータを独立にそれぞれ3段階または4段階に変化させるが、その他の変化させないパラメータは前節で述べた都市モデルの値に固定する。実際には建物の高さにより日射受熱量が影響を受けたり、建物または地表面の材料の変化により熱伝

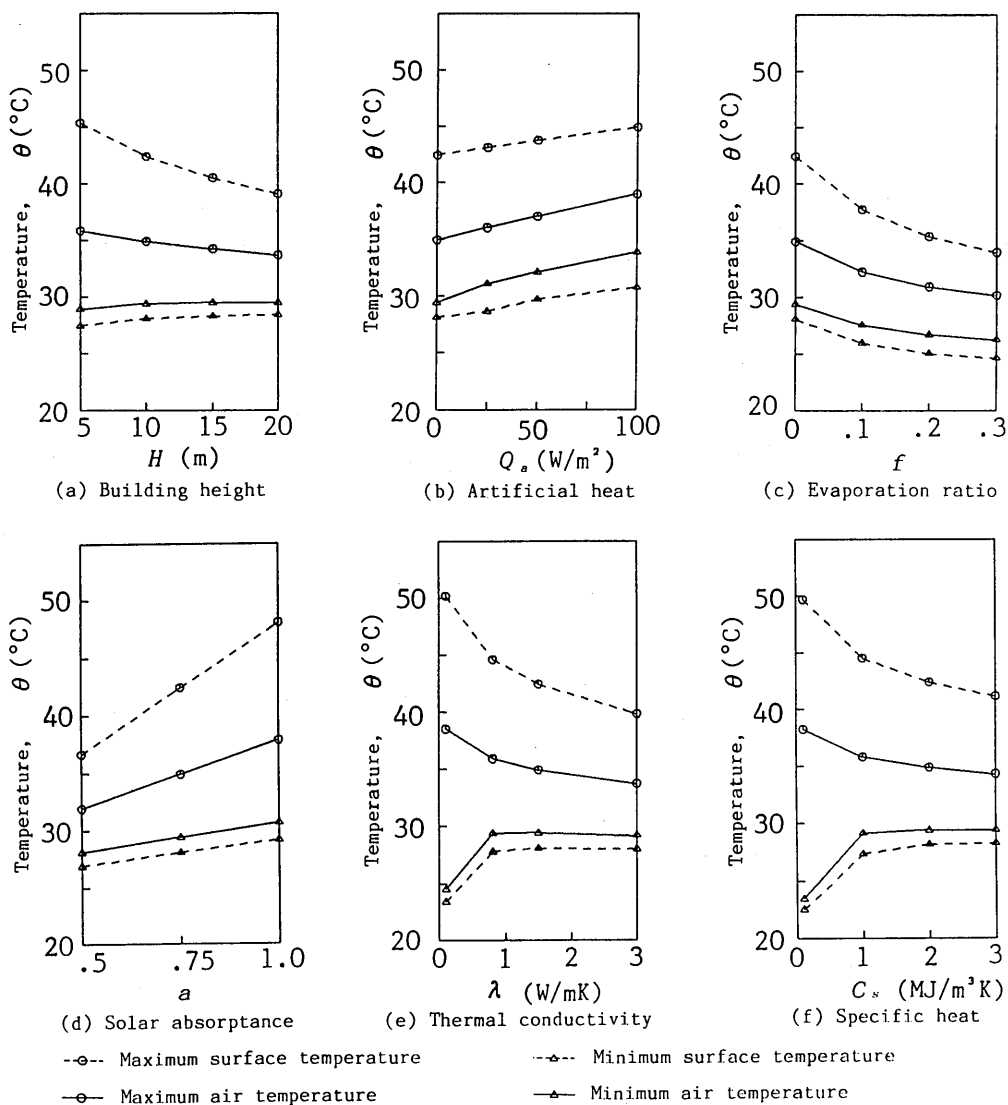


Fig. 8 Results of parameter analyses in urban area.

導率や容積比熱等が同時に変化するなど、これらのパラメータは相互に関連するものであるが、ここではすべて独立した要素として扱い、都市熱環境に対する各パラメータの感度を調べる。なお、入力条件となる日射量、大気放射量および境界条件はすべて前節で用いたものと同じである。

数値シミュレーションの結果はすべて、2日目の最

高表面温度、最低表面温度およびキャノピー層内の最高気温、最低気温で評価する。各パラメータに対するこれらの変化を Fig. 8 に示す。建物の高さが高くなると、最高温度は下がるが最低温度はやや上がる傾向がある。これは地表面粗度が大きくなったために拡散が大きくなるとともに、表面積が増加しているので蓄熱量が増大したためと考えられる。人工廃熱および日

射吸収率の増加に対して各温度が単調増加し、蒸発比の増加に対して各温度が単調減少するのは常識的な結果である。また、熱伝導率および容積比熱の増加に対して、最高温度と最低温度の差が小さくなる傾向も常識的と考えてよい。これらの結果はこのモデルの妥当性を示すものと考えてよい。

5. 結 論

キャノピー層内の建物形状やその配置を考慮して地表面熱収支をとらえる一次元モデルを提案し、これにより都市の大気境界層に関するシミュレーションを行った結果、次のような知見を得た。

(1) 接地層上端の気温および風速の実測値を境界条件とし、その他の熱環境に関するパラメータを常識的な範囲内で適当に調整し、気温の経時変化およびその垂直分布とも実測値とよく一致する結果を得た。

(2) 熱環境の形成に関するいくつかのパラメータを都市および田園に対する値に設定することにより、両者の違いが明確に表れ、田園に比較して、最低気温が上昇し、気温日較差が小さくなるという都市の気温の特徴を示すことができた。

(3) 上記のパラメータの値を段階的に変化させて、都市の熱環境に対するこれらの影響を調べたところ、各パラメータの変化に対して妥当な温度変化の傾向を示すことが明らかになった。

これらの結果はこのモデルの妥当性および種々の都市熱環境の予測が可能であることを示すものである。

記 号 表

A : 表面積の増加率
 B : 建物の幅 (m)
 C_e : Dalton 数
 C_h : Stanton 数
 C_p : 大気の定圧比熱 (J/kgK)
 C_v : 伝導層の容積比熱 (MJ/m^3K)
 H : 建物高さ (m)
 K_e : 水蒸気に関する渦拡散係数 (m^2/s)
 K_h : 熱に関する渦拡散係数 (m^2/s)
 L : Monin-Obukhov の安定度長さ (m)
 L_R : 大気放射量 (W/m^2)
 P_r : 空気の Prandtl 数
 Q_H : 接地層の顕熱フラックス (W/m^2)
 Q_E : 接地層の潜熱フラックス (W/m^2)

Q_R : 接地層の放射収支量 (W/m^2)
 Q_a : 人工廃熱 (W/m^2)
 Q_c : 蒸発潜熱量 (W/m^2)
 Q_d : 対流伝熱量 (W/m^2)
 Q_s : 伝導熱量 (W/m^2)
 R : 街路の幅 (m)
 S_R : 水平面全天日射量 (W/m^2)
 T : 絶対温度または温位 (K)
 T_c : キャノピー層内の気温 (K)
 T_s : 表面温度 (K)
 T_0 : 周囲温度 (K)
 T_* : 摩擦温度 (K)
 U : 風速 (m/s)
 U_H : 建物高さの風速 (m/s)
 U_c : キャノピー層内の風速 (m/s)
 U_* : 接地層の摩擦速度 (m/s)
 Z : 地表面からの高さ (m)
 Z_0 : キャノピー層の粗度 (m)
 a : 都市キャノピー層の見かけの日射吸収率
 f : 蒸発比
 g : 重力加速度 (m/s^2)
 h : 表面の平均粗度高さ (m)
 l : 水の気化熱 (J/kg)
 n : 伝導層の深さ (m)
 q : 比湿 (kg/kg)
 q_c : キャノピー内の比湿 (kg/kg)
 q_s : 表面温度に対する飽和比湿 (kg/kg)
 q_* : 摩擦比湿 (kg/kg)
 t : 時間 (s)
 u_* : 表面近傍の摩擦速度 (m/s)
 y : 表面から距離 (m)
 y_0 : 表面の粗度 (m)
 ϵ : 都市キャノピー層の見かけの長波長放射率
 ξ : 無次元高さ
 θ : 温度また温位 ($^{\circ}C$)
 κ : Karman 定数
 λ : 伝導層の熱伝導率 (W/mK)
 ν : 空気の動粘性係数 (m^2/s)
 ρ : 空気の密度 (kg/m^3)
 σ : Stefan-Boltzman 定数 (W/m^2K^4)
 ϕ_c : 比湿に関する普遍関数
 ϕ_h : 温位に関する普遍関数
 ϕ_m : 風速に関する普遍関数

参 考 文 献

- 1) Myrup, L. O.: A Numerical Model of the Urban Heat Island, *J. of Applied Meteorology*, Vol. 8, pp. 908—918, 1969.
- 2) 片山忠久, 他5名: 水面を有する市街地の熱環境に関する調査研究, *日本建築学会計画系論文報告集*, No. 372, pp. 21—29, 1987.
- 3) 竹内清秀, 近藤純正, *大気科学講座1*, 東京大学出版会, 1981.
- 4) O'Brien, J. J.: A Note of the Vertical Structure of the Eddy Exchange Coefficient in the Planetary Boundary Layer, *J. of the Atmospheric Sciences*, Vol. 27, pp. 1213—1215, 1970.
- 5) アー・エス・モーニン, アー・エム・ヤグロム, 山田豊一訳: *統計流体力学2*, 文一総合出版, 1976.
- 6) 内藤和夫, 水野 稔: 都市域における建物密度と日射吸収率の関係, *空気調和・衛生工学会論文集*, No. 5, pp. 33—42, 1977.
- 7) Lettau, H.: Note on Aerodynamic Roughness-Parameter Estimation on the Basis of Roughness-Element Description, *J. of Applied Meteorology*, Vol. 8, pp. 828—832, 1969.
- 8) Plate, E.: *Engineering Meteorology*, Elsevier's Scientific Publishing Company, 1982.
- 9) Kondo, J.: Relationship Between the Roughness Coefficient and Other Aerodynamic Parameters, *J. of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 49, No. 2, pp. 121—124, 1971.
- 10) Yaglom, A. M., Kader, B. A.: Heat and Mass Transfer between a Rough Wall and Turbulent Fluid Flow at High Reynolds and Péclet Numbers, *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 62, pp. 601—623, 1974.
- 11) *伝熱工学資料* (改訂第4版), 日本機化学会, 1986.
- 12) 齊藤平蔵, *建築気候*, 共立出版, 1974.
- 13) 田中俊六, 他3名: *建築環境工学*, 井上書院, 1981.